

Primljen / Received: 5.12.2017.

Ispravljen / Corrected: 12.3.2018.

Prihvaćen / Accepted: 18.4.2018.

Dostupno online / Available online: 10.7.2018.

# Mogućnost ojačanja cementnog kompozita vlaknima brnistre

## Autori:

Prof.dr.sc. **Sandra Juradin**, dipl.ing.građ.

Sveučilište u Splitu

Fakultet građevinarstva, arhitekture i geodezije  
[sandra.juradin@gradst.hr](mailto:sandra.juradin@gradst.hr)Prof.dr.sc. **Ivica Boko**, dipl.ing.građ.

Sveučilište u Splitu

Fakultet građevinarstva, arhitekture i geodezije  
[ivica.boko@gradst.hr](mailto:ivica.boko@gradst.hr)

Prethodno priopćenje

**Sandra Juradin, Ivica Boko**

## Mogućnost ojačanja cementnog kompozita vlaknima brnistre

Danas se u svijetu posvećuje velika pozornost upotrebi celuloznih vlakana u kompozitnim materijalima. Pokušava se pronaći što bolja, ekološki prihvatljiva, jeftinija, obnovljiva i po mogućnosti lokalno dostupna zamjena klasičnim sintetičnim vlaknima. Kvaliteta prirodnih vlakana uvelike ovisi o njihovom porijeklu, načinu dobivanja, sastavu i fizikalnim svojstvima. U radu su dani rezultati ispitavanja mogućnosti upotrebe vlakna samonikle biljke brnistre ubrane na lokalnom području za potrebe ojačanja cementnog morta. Dobiveni rezultati pokazuju da kvaliteta vlakana brnistre ne zaostaje za poznatim vlaknima konoplje i lana.

### Ključne riječi:

brnistra, prirodna vlakna, cementni mort, čvrstoća kompozita

Preliminary report

**Sandra Juradin, Ivica Boko**

## Possibility of cement composite reinforcement by Spanish broom fibres

A considerable attention is currently paid worldwide to the use of cellulose fibres in composite materials. Attempts are made to find even better, environmentally more acceptable, less expensive, renewable and, if possible, locally available replacement for traditional synthetic fibres. The quality of natural fibres is greatly dependent on their origin, processing requirement, composition, and physical properties. Results obtained by testing possibilities of using fibres of the wild plant called Spanish broom, collected locally for cement mortar reinforcement, are presented in the paper. The results show that the quality of Spanish broom fibres is not inferior to the quality of known hemp and flax fibres.

### Key words:

Spanish broom, natural fibres, cement mortar, composite strength

Vorherige Mitteilung

**Sandra Juradin, Ivica Boko**

## Möglichkeit der Verstärkung von Zement-Verbund mit Ginsterfasern

Heute wird in der Welt der Verwendung von Zellulosefasern in Verbundmaterialien große Aufmerksamkeit geschenkt. Man versucht den besten, umweltfreundlichsten, billigsten, erneuerbaren und nach Möglichkeit lokal verfügbaren Ersatz für klassische synthetische Fasern zu finden. Die Qualität der Naturfasern hängt weitestgehend von deren Herkunft, der Art ihrer Gewinnung, der Zusammensetzung und den physikalischen Eigenschaften ab. In der Abhandlung werden die Ergebnisse der Untersuchung der möglichen Verwendung der Fasern der wild wachsenden Ginsterpflanzen, die auf dem lokalen Gebiet gepflückt wurden, zum Zweck der Verstärkung von Zementmörtel vorgelegt. Die erhaltenen Ergebnisse zeigen, dass die Qualität der Ginsterfasern nicht hinter den bekannten Hanf- und Flachsfasern zurücksteht.

### Schlüsselwörter:

Ginster, Naturfasern, Zementmörtel, Verbundfestigkeit

## 1. Uvod

Kompozit je kombinacija najmanje dva različita materijala radi dobivanja novog, drugačijeg materijala, sa značajno poboljšanim fizikalnim ili kemijskim svojstvima pojedinačnih komponenata ili sa svojstvima koja te komponente same nemaju. Kompozitni materijali ojačani vlaknima imaju povećanu žilavost, savojnu i vlačnu čvrstoću, čvrstoću na umor, dinamičku čvrstoću i otpornost na udarce. Vlakna su kratki elementi povećane vlačne čvrstoće, a karakterizira ih kvocijent oblika - omjer duljine i promjera vlakna. Dodavanje vlakana u matricu krutog materijala poput betona odgađa širenje mikropukotina prenošenjem naprezanja s mjesta nastale pukotine na susjedne presjeke [1]. Vlakna mogu biti čelična, sintetična i prirodna. Sintetična se dijele na organska i anorganska, a prirodna na vlakna biljnog, životinjskog i mineralnog porijekla.

Trošenje neobnovljivih izvora sirovina, ispuštanje 30 % od ukupne emisije ugljičnog dioksida, dovelo je do toga da se u novije vrijeme, naročito u području materijala, naglašava potreba za održivim razvojem i primjenom ekološki prihvatljivih materijala. Proizvodnja sintetičnih vlakana bazira se na skupim strojevima i velikim ulaganjima, a odvija se uglavnom u razvijenim zemljama. S druge strane, proizvodnja prirodnih vlakana može se provesti ljudskom radnom snagom i tradicionalnim znanjima [2]. Kao zamjena za čelična i sintetična vlakna pokušavaju se sve više koristiti prirodna vlakna od jute, sisala, lana, konoplje, banane, palme, henekena, kenafa, ramije, pamuka i ostalih vrsta vlakana od celuloze [3].

Prednost prirodnih u odnosu na ostala vlakna jest u tome što su lokalno dostupna, ekonomična, biorazgrađiva, obnovljiva, male gustoće, sigurnija za rukovanje i proizvodnju, nisu abrazivna pa štede opremu, nisu vodiči, itd., a imaju potrebna mehanička svojstva za poboljšanje kompozita. Prirodna vlakna nastaju procesom fotosinteze u kojem biljka uzima ugljični dioksid a ispušta kisik. Uporabom celuloznih vlakana moguće je smanjiti plastično skupljanje, povećati toplinsku i zvučnu izolaciju, te prigušiti vibracije u cementnim kompozitima.

Celulozna vlakna imaju i nedostatke: problem trajnosti, ograničeno doziranje i odstupanje u kvaliteti. Dosadašnje spoznaje u vezi s trajnošću vlakana pokazuju potrebu za temeljitim ispitivanjima prije nego se krene u ozbiljniju proizvodnju cementnih kompozita ojačanih prirodnim vlaknima. Razgradnja vlakana u cementnom kompozitu događa se pod utjecajem alkalija, koje otapaju lignin i hemicelulozu. Utjecaj alkalija na razgradnju vlakana može se smanjiti ako se dio cementa u kompozitu zamijeni letećim pepelom, metakaolinom, silikatnom prašinom, zgurom, pepelo, dobivenim izgaranjem rižinih ljuski i sličnim materijalima. Ponekad ni niska količina alkalija u cementnom kompozitu nije dovoljna da se spriječi razlaganje lignina. Moguća je i obrada vlakana prije ugradnje u kompozite, kako bi se uklonili dijelovi vlakana osjetljivi na djelovanje alkalija. Vlakna se mogu obložiti vodoodbojnim sredstvima ili se mogu impregnirati natrijevim silikatom, natrijevim sulfatom ili magnezijevim sulfatom. Dosadašnja iskustva s oblaganjem vlakana silanom upućuju na povećanje

trajnosti betona ojačanih prirodnim vlaknima, povećanu vlačnu čvrstoću i čvrstoću na savijanje. Smanjenje alkalnosti cementnog kompozita moguće je postići i ubrzanom karbonatizacijom, pri čemu vapno s ugljičnim dioksidom formira kalcijev karbonat  $\text{CaCO}_3$ . Ovaj postupak utječe i na trajnost i svojstva kompozita. [4, 5].

Doziranje vlakana u mikroarmiranim betonima može biti u granicama od 0,2 do 2 %. Veća količina vlakana otežava miješanje i ugradnju betona, kao i problem jednolikog rasporeda vlakana po volumenu. U praksi se vlakna dodaju u miješalicu, u već prethodno zamiješani beton. Kvaliteta prirodnih vlakana ovisi o više faktora: kemijskom sastavu, promjeru i geometriji vlakna, dužini, površinskoj hrapavosti, načinu dobivanja vlakana, o geografskim i klimatskim uvjetima. Ograničena je upotreba tih vlakana i zbog niže maksimalne temperature prerade te hidrofilnih svojstava.

Prirodna vlakna imaju visoku vlačnu čvrstoću a nizak modul elastičnosti. Prema sastavu, celulozna vlakna sastoje se uglavnom od celuloze, hemiceluloze, lignina, voska i pektina. Svojstva vlakana uvelike ovisi o kemijskom sastavu, posebno udjela celuloze, hemiceluloze i lignina. Celuloza je najkrući i najjači dio vlakna koji ga čini čvršćim i žilavijim. Celulozna vlakna su polarna i hidrofilna, upijaju veliku količinu vode te imaju i malu otpornost na vlagu. To je često uzrok loše kontakne zone između vlakna i matrice, a posljedično i loših mehaničkih svojstava kompozita, posebice ako je matrica hidrofobna kao kod polimera. Hemiceluloza je topiva u vodi i higroskopna. Vezana je za celulozu jakim vodikovim vezama, a može se razgraditi u uvjetima visoke temperature. Hemiceluloza čini vezu između celuloze i lignina, a bez lignina biljka ne može postići rast u visinu. Veća količina lignina negativno utječe na vlačnu čvrstoću i modul elastičnosti [5].

Industrija je sve više zainteresirana za primjenu materijala male težine, dovoljne trajnosti, koji su ekološki prihvatljivi i imaju zadovoljavajuća mehanička svojstva. Stoga su celulozna vlakna zbog svoje biorazgrađivosti, relativno jednostavnog procesa prerade, male gustoće, sve zanimljivija. Očekuje se da će u idućem razdoblju porasti interes za ojačanje materijala prirodnim vlaknima. Sadašnja svjetska godišnja proizvodnja prirodnih vlakana u rasponu je od 70.000 (abaka) do 75.000.000 tona (šećerna trska) [6].

Na stranici FAO organizacije [2] piše: *lako se klima razlikuje od zemlje do zemlje, raznolikost prirodnih vlakana je široka, što rezultira činjenicom da u svakoj klimi (s izuzetkom ekstremnih suhih i hladnih klimatskih uvjeta) može rasti barem jedan vlaknasti usjev*. To je potaknulo autore ovog rada da ispituju mogućnost upotrebe vlakana brnistre, raširene biljke mediteranskog područja, kao ojačala u cementnom kompozitu.

## 2. Brnistra (žuka, *Spartium junceum* L.)

### 2.1. Rasprostranjenost i povijest

Primjena brnistre datira još iz vremena Grka, Rimljana i Kartažana [7], a smatra se da je grad Split dobio ime po grčkoj

riječi *Asphalatos* što znači brnistište. Brnistra je grmolika biljka koja raste u mediteranskom području, a poslije otkrića Amerike proširila se na Sjevernu i Južnu Ameriku, raste u područje jugozapadne Azije te sjeverozapadne Afrike. Dok je u SAD-u i Novom Zelandu tretiraju kao korov, na području Mediterana oduvijek je imala široku primjenu. Koristila se kao tekstilna sirovina, za vezivanje loze, izradu konopa, košara, vreća, mreža, brnistrom su se pokrivali krovovi, a brala se kako samonikla (slika 1.) tako i kultivirana. Od brnistre su se izrađivale metle (eng. *broom*) pa joj od toga i dolazi engleski naziv *Spanish broom*.



Slika 1. Brnistra

Prema [7], brnistra se sadila u Španjolskoj, Francuskoj i Italiji tamo gdje konoplja i lan ne mogu uspijevati zbog jako lošeg tla jer kako se u [8] navodi: *Brnistra je ipak svojim skromnim zahtjevima samonikla, divlja na mršavim kamenjarima vrućih i sušnih obala i otoka Sredozemlja, nadživjela lan i konoplju*. Podnosi zagađenja koje nose gradovi i temperature do  $-20^{\circ}\text{C}$ . Grm brnistre živi do 25 godina.

U Hrvatskoj brnistra raste na jadranskoj obali i po otocima. Kako je samonikla, njezin raspored je nejednoličan. Osim Splita, i druga su mjesta dobila ime po brnistri odnosno žuki: Žanestra (Umag), Brneštrovica (Cres), Žukovac (Mljet), Žukova (Hvar),

Žukova (Korčula), Brnještrovac (Mljet). U prošlosti se najviše njome koristilo u okolici Šibenika (Vodice, Pirovac, Zaton), gdje se brnistra prela i tkala. Pedesetih godina prošlog stoljeća vlakno brnistre se prerađivalo na 30 lokacija jadranskog područja. Zanimljivo je da postoje i područja na kojima nema brnistre, kao što su otoci Lastovo i Vis [8].

U Omišu je početkom 20. stoljeća izgrađena tvornica za preradu brnistre, ali je zbog loše upravljanog postupka prerade propala prerada naveliko. Pokušalo se je upotrijebiti brnistru i za izradu papira u riječkoj tvornici papira. U pokusnoj stanici u Sušaku obavljala su se prethodna ispitivanja za industrijsku preradu brnistre, a postojali su planovi i za buduće pogone.

Nakon drugog svjetskog rata počelo je otkupljivanje suhих izbojaka brnistre u svrhu tekstilne i papirne industrije. Čak su se izgradile i male tvornice u Vodicama, Zakuću i Opuzenu. Međutim, pokazalo se da je priprema i prerada brnistre zahtjevan posao, pa su je istisnule druge industrijske biljke [8].

Brnistra kao tekstilna sirovina počinje gubiti značenje 60-ih godina prošlog stoljeća. Tada je zabilježeno da se tkanje brnistrom izvodi još samo na deset lokacija, a u Viru, Olibu, Istu, Filip-Jakovu, Biogradu i Betini se prerađuje u vlakno. Nabrojanih šest lokacija prerade vlakna čini samo 20 % prerade koja se obavljala sredinom pedesetih godina.

## 2.2 Svojstva brnistre i primjena vlakana u kompozitima

Brnistra raste uglavnom kao grm visine između 1 i 1,5 m, a mogu se naći primjerci i do 3 m visine, pa i viši. Korijenje je jako i dobro razvijeno, žile čvrste i dobro ukopane u tlu, pa se brnistra upotrebljava kao i zaštita od erozije. Brnistra, poput drugih mahunarki, obogaćuje tlo dušikom. Može rasti na glinenim, vapnenim, neutralnim, kiselim i alkaličnim tlima. Poznata je po jarko žutim cvjetovima vrlo intenzivnog mirisa (slika 2.) koji se javljaju u kasno proljeće. Zbog svog mirisa posebno privlači pčele, pa je ta biljka važna za pčelarstvo. Cvjetovi su se koristili u ljekovite svrhe, njima su se punili jastuci i madraci ili su se koristili kao pigmenti i parfemi.



Slika 2. Brnistra u cvatu, pogled na Krku (fotografija: dr. Biserka Perković)



Slika 3. Izbojci brnistre (lijevo) i uzdužni prerez stabljike brnistre napravljen mikroskopom Opton Axioskop MC 63A: 2- sklerenhim, 3 - parenhim s kloroplastima (desno)

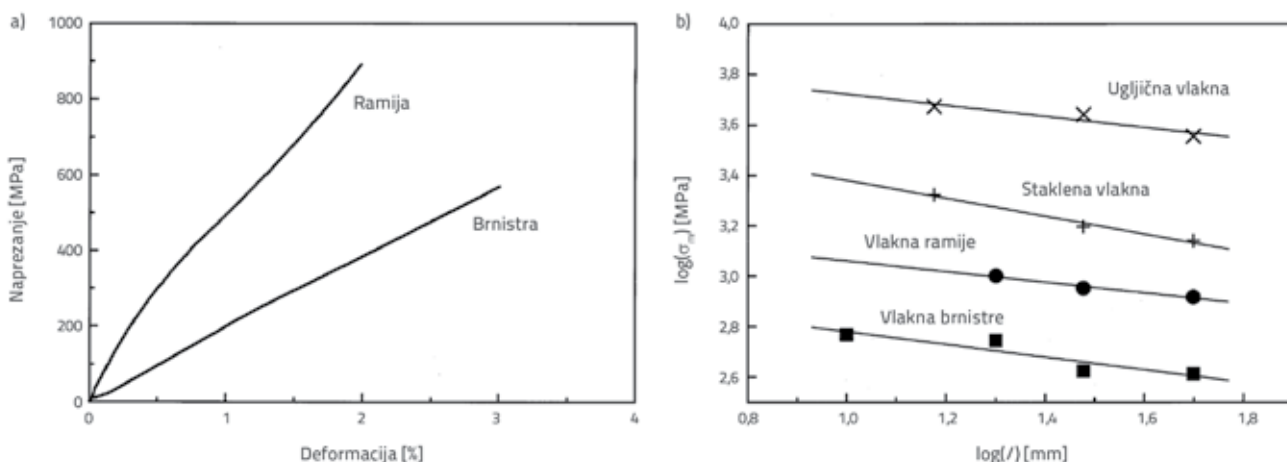
Grane su vrlo žilave i najvažniji su dio biljke, slika 3. Sastoje se od dva sloja: vanjskog i unutrašnjeg. Dok je unutrašnji dio krut i drvenast s poroznom sredinom, u vanjskom sloju su dvije vrste žilavih vlaknastih stanica povezanih pektinskim lamelama u snopiće (elementarno vlakno), te snopići međusobno vezani ligninom uzduž grančice (tehničko vlakno) [8]. Elementarna vlakna brnistre pravilnog su promjera i iznose od 5 do 10 mikrometara, a promjer snopa je oko 50 mikrometara [9, 10]. Izbojci brnistre imaju visok udio celuloze, a vrijednost ovisi o načinu dobivanja vlakana. Svojstva brnistre u odnosu na neka druga poznata vlakna prikazna su u tablici 1.

Prema tablici 1., brnistra ima najmanju specifičnu težinu među svim vlaknima, a vrijednost vlačne čvrstoće je u području kao kod većine prirodnih vlakana. Istraživanja kvalitete vlakana brnistre uglavnom su usmjerena na primjenu u tekstilnoj industriji, ali postoje i istraživanja u kojima se brnistra promatra kao ojačalo kompozita, naročito biopolimera. Tako su napravljena i neka istraživanja primjene vlakna brnistre kao ojačala kompozitnog materijala.

Tablica 1. Svojstva biljnih vlakana [3, 8]

Vrsta	Specifična masa	Vlačna čvrstoća [MPa]
Brnistra	0,95-1,05	400-750
Lan	1,40-1,52	500-900
Konoplja	1,42-1,54	310-750
Pamuk	1,5-1,6	300-700
Juta	1,44-1,53	320-800
Kenaf	1,4	223-930
Ramija	1,0-1,55	400-1000
Sisal	1,33-1,5	363-700

Angelini i ostali [9, 10] su vlakno brnistre usporedili s vlaknom ramije i s umjetnim vlaknima. Vlakno brnistre ima nešto slabije mehaničke karakteristike od ramije, slika 4.a.



Slika 4. a) Dijagram naprezanje-deformacija; b) Utjecaj ispitne duljine uzorka na čvrstoću vlakana brnistre, ramije, ugljikovog i staklenog vlakna, prema [9]

Oba vlakna imaju dijagram naprezanje-deformacija gotovo linearan do loma. Modul elastičnosti za ramiju iznosi oko 65 a za brnistru oko 21,5 GPa, što je u rangu vlakana pamuka (5,5 - 12,6 GPa), jute (30 GPa) sisala (9 - 38 GPa [3]) i sličnih celuloznih vlakana. Autori ističu da iako je modul elastičnosti vlakna brnistre oko 30 % vrijednosti vlakna ramije, još uvijek je viši od nekih neorijentiranih polimera čija vrijednost je između 1 i 3 GPa, što ga čini pogodnim za ojačanje nekih kompozitnih materijala. Prema slici 4.b, usporedba tih dvaju celuloznih vlakana s umjetnim vlaknima ugljika i E-stakla pokazuje da su umjetna vlakna jača od celuloznih ali im je specifična težina veća od celuloznih, što upućuje na to da oba celulozna vlakna mogu služiti kao ojačala, makar u nekonstrukcijskim primjenama. Na slici je vidljivo da sve četiri vrste vlakna imaju isti trend, da porastom ispitne duljine vlakna opada čvrstoća. Nadalje, autori su pokazali da su čvrstoće sučelja celuloznih vlakana i matrice od epoksidne smole za 1.4 do 2.2 više nego kod umjetnih vlakana [9].

Nekka i drugi [11] istraživali su upijanje vode kompozita napravljenog od polipropilenske matrice i vlakana brnistre. Nakon što su se uzorci prethodno osušili do konstantne mase na 70°C, stavljeni su u destiliranu vodu na temperaturu 23 i 85°C. Cilj ispitivanja je bio odrediti utjecaj udjela vlakana brnistre, utjecaj obrade površine vlakana silanom i temperature na količinu upijene vode u kompozitu. Uočeno je da je količina upijene vode veća što je udio vlakana brnistre u kompozitu veći. Kompozit s tretiranim vlaknima brnistre ima manje upijanje u odnosu na kompozit s netretiranim vlaknima. Udarne čvrstoće kompozita značajno ovise o količini upijene vode, a uzorci zasićeni vodom imali su nisku udarnu čvrstoću. Kod vlakana tretiranih silanom, snimke dobivene skenirajućim mikroskopom pokazuju na smanjenje površinske hrapavosti vlakana, što omogućuje dobru prionjivost vlakna i polipropilenske matrice.

Picuno [12] je pokušao vlaknima brnistre armirati čerpič. Čerpič je tradicionalna opeka koja se suši na suncu, a pravi se od gline. Obično se dobije kao smjesa krupnog pijeska, glinovitog materijala i vapna. Dodatak vlakana smanjuje raspucavanje proizvoda dok se suši na suncu. Autor je napravio uzorke oblika kocke, stranice 15 cm, koji su u sastavu imali 49,3 % gline, 36,9 % sedimenta (silt) i 13,8 % pijeska. U mješavini su dodana prirodna vlakna u količini od 1/3 volumena, a prema vrsti i načinu dodavanja vlakana formirane su četiri grupe uzoraka: uzorci ojačani pšeničnom slamom slobodno raspoređeni po volumenu ili položeni okomito na tlačno opterećenje, te uzorci ojačani brnistrom koja je slobodno raspoređena po volumenu ili ugrađena okomito na smjer tlačnog opterećenja. Dobivene vrijednosti tlačne čvrstoće u rangu su čvrstoća čerpiča koji nije ojačan. Autor je ispitivao vlačnu čvrstoću brnistre, kao cijele grančice i kao upredenog konopa. Vlačna čvrstoća izbojka brnistre iznosi  $41,53 \pm 4,13$  N/mm<sup>2</sup>, a užeta  $36,32 \pm 6,37$  N/mm<sup>2</sup>. U zaključku rada autor naglašava kako brnistra u okviru prirodnih vlakana ima potencijala za poboljšanje čerpiča, a potrebna su daljnja istraživanja kako je najbolje iskoristiti.

Vlakna brnistre su u Italiji i dalje predmet proučavanja. Kako je najveća zamjerka upotrebi brnistre način dobivanja vlakana,

autori [13] sa Calabrian High Tech S.r.l patentirali su uređaj za proizvodnju vlakana. Postoji šest faza kroz koje odrezani grm brnistre treba proći da bi se došlo do željenih vlakana. Na slici 5. je prikazan položaj grma u prvoj fazi prerade. Ideja je da jedan radnik započne proces proizvodnje vješanjem grma brnistre u okvir, a onda je daljnji postupak automatiziran. U početnoj fazi se paralelno obrađuju četiri grma, ali se predviđa udvostručiti broj mjesta na držaču. Iako je pogon započeo s radom, količina proizvedenih vlakana još uvijek nije dovoljna te se radi na poboljšanju procesa proizvodnje.



Slika 5. Prva od šest faza prerade brnistre [13]

### 3. Eksperimentalni dio

U eksperimentalnom dijelu rada napravljene su cementne mortne prizmice ojačane vlaknima brnistre. Upotrijebljen je cement CEM I 42.5 R i CEN standardni pijesak, EN 196 - 1. Za izradu serije od tri prizmice potrebna je vrećica standardnog pijeska od 1350 g, cementa 450 g i vode 225 g. Mort je miješan u standardnoj laboratorijskoj miješalici. Nakon 30 sekundi miješanja cementa i vode, nastavlja se automatsko dodavanje pijeska uz miješanje 30 sekunda, a onda još toliko za miješanje morta većom brzinom. Nakon toga se prekida standardni program miješanja, posuda izvadi iz miješalice, dodaju vlakna brnistre i nastavi ručno miješanje. Vlakna brnistre u originalnoj duljini prikazana su na slici 6., a za potrebe ispitivanja izrezana su na tri duljine:  $10 \pm 2$  mm;  $20 \pm 2$  mm i  $30 \pm 2$  mm. Ovisno

o duljini vlakana, uzorci su označeni sa B1, B2 i B3 gdje broj označava duljinu vlakna u centimetrima. Vlakna su u cementni mort dodana u količini od 0,5 i 1 % volumena. Uzorci sa 0,5 % vlakana označeni su sa -05, a sa 1 % vlakana sa -1. Dvije serije uzoraka s vlaknima duljine 10 mm napravljene su u količini od 0,25 i 0,75 % volumena.



Slika 6. Vlakna brnistre

Mortu se u svježem stanju ispitala obradivost metodom rasprostiranja. Kalup oblika krnjeg stošca napunio se mortom u dva sloja. Svaki se sloj zbijao 10 puta pri čemu je nakon 15 sekundi odignut kalup. Stolić za rasprostiranje podizao se i spuštao 15 puta, svaki puta brzinom jedne sekunde u sekundi. Određena je srednja vrijednost promjera morta u dva okomita smjera, a dobiveni rezultati prikazani su i ocijenjeni u tablici 2.

Tablica 2. Obradivost morta

Uzorak	Konzistencija [mm]	Kategorija
Etalon	188	plastična
B1-05	135	kruta
B1-1	140 (rasuto)	kruta
B2-05	138	kruta
B2-1	125	kruta
B3-05	153	plastična
B3-1	130	kruta
B1-025	141	plastična
B1-075	133 (rasuto)	kruta

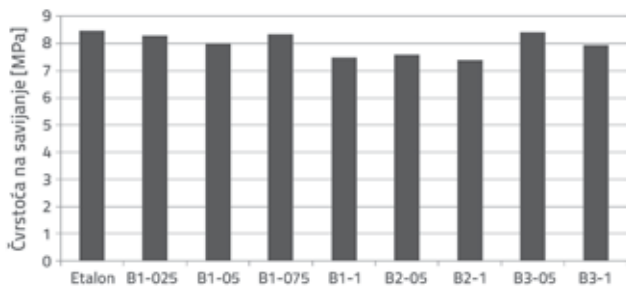
Na slici 7. vidi se pad obradivosti mortova B1-05 i B1-1 u odnosu na etalon, što je očekivano jer se količina vode u uzorcima držala konstantnom. Rezultati mješavine B1-1 brojčano su bolji u odnosu na B1-05, ali se uočava lošija obradivost, tj. riječ je o suhoj konzistenciji. Prema tablici 2., duljina vlakna ne utječe na obradivost već količina u kojoj se vlakna doziraju. Sličan trend pada obradivosti dobili su Islam i ostali [14] kad su uspoređivali rezultate običnog betona i betona visokih čvrstoća ojačanih čeličnim i prirodnim kokosovim vlaknima. Dodana količina vlakana je bila 0,5 i 1 % volumena, kao i u ovom radu. Mjereći



Slika 7. Obradivost morta bez vlakana, 0,5 % vlakna, 1 % vlakana

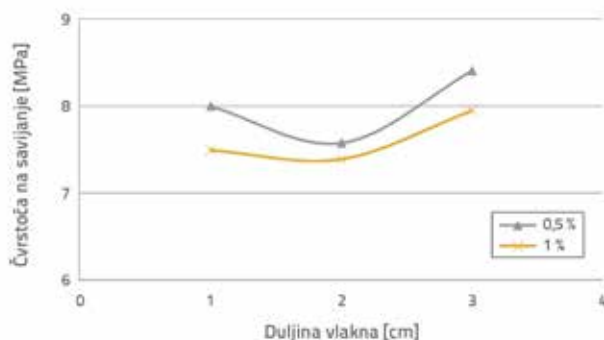
slijeganje obju vrsta betona, dobili su da je pad obradivosti veći kod većeg udjela vlakana te da je pad obradivosti kod ojačanja prirodnim vlaknima znatno veći nego kod čeličnih vlakana. Primjerice, za obje vrste betona 1 % kokosovih vlakana smanjilo je veličinu slijeganja za 92 %.

Mort je zatim ugrađen u trodijelni kalup na vibrostolu. Nakon 24 sata čuvanja u vlažnoj komori, uzorci su izvađeni iz kalupa, stavljeni u vodu i tamo njegovani 27 dana do ispitivanja. Rezultati ispitivanja čvrstoće na savijanje prikazani su na slikama 8. i 9.



Slika 8. Rezultati ispitivanja čvrstoće na savijanje

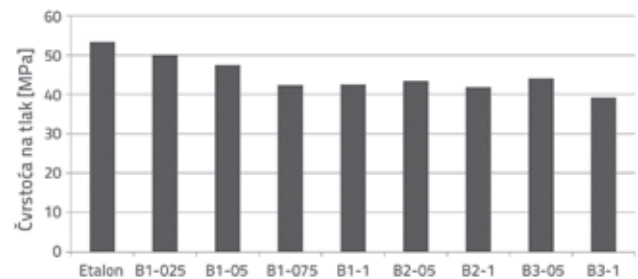
Prema slici 8., uzorci s vlaknima brnistre imaju nešto niže čvrstoće na savijanje u odnosu na etalon. Najniže vrijednosti su ostvarili uzorci B1-1, B2-05 i B2-1, čije su čvrstoće za 10,6 do 12,8 % niže od etalona, a uzorci B3-05, B1-025 i B1-075 su najbliži vrijednosti etalona. Na slici 9. prikazan je utjecaj duljine i količine vlakana na rezultate čvrstoće na savijanje. Prema dijagramu, veći udio vlakna ostvaruje niže čvrstoće, a vlakna duga 10 i 30 mm imaju bolje rezultate od vlakana duljine 20 mm. Kiran i ostali [15] također su dobili da je optimalna duljina prirodnih vlakana oko 30 mm. Ispitujući vlačnu čvrstoću kompozita ojačanog vlaknima konoplje, banane i sisala uočili su da čvrstoća raste s povećavanjem duljine vlakana od 10 mm do približno 32 mm, a zatim daljnjim povećavanjem duljine vlakana do 70 mm, ta čvrstoća opada.



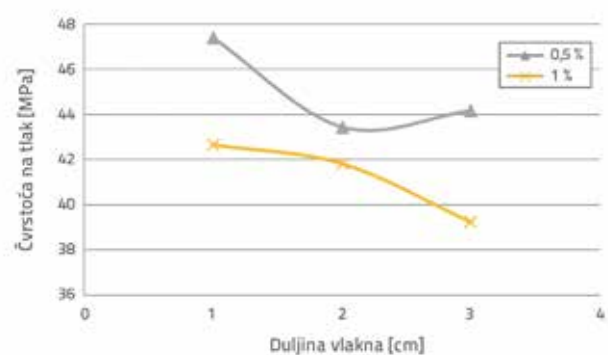
Slika 9. Utjecaj duljine i količine vlakana na rezultate čvrstoće na savijanje

Rezultati tlačne čvrstoće, slika 10. i 11., pokazuju da udio vlakana, ali i njihova duljina, utječu na dobivene vrijednosti. Što je udio vlakana veći, to je dobivena čvrstoća manja.

Kako se mort s dodatkom vlakana teže zbija i ugrađuje, u takvom betonu je povećana poroznost te je dobiveni rezultat očekivan.

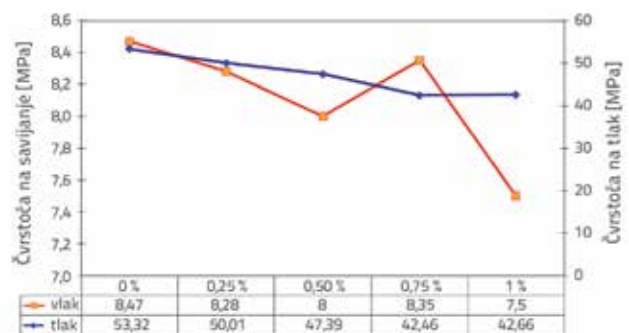


Slika 10. Rezultati ispitivanja čvrstoće na tlak



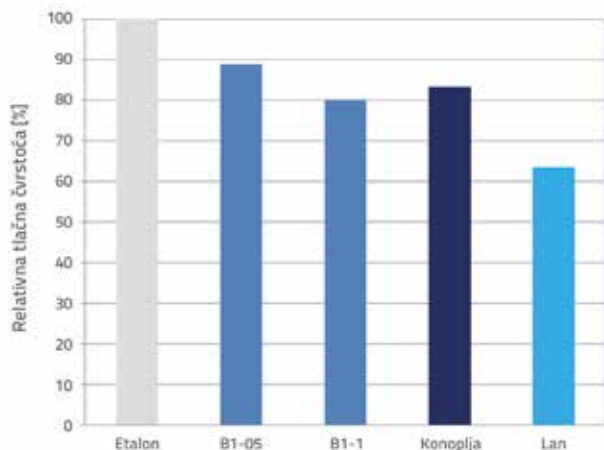
Slika 11. Utjecaj duljine i količine vlakana na rezultate čvrstoće na tlak

Za uzorke s vlaknima duljine 10 mm prikazana je veza čvrstoće i količine vlakana. Objе čvrstoće kontinuirano opadaju s povećanjem udjela vlakana, samo se kod čvrstoće na savijanje pojavilo odstupanje kod uzorka B1-075.

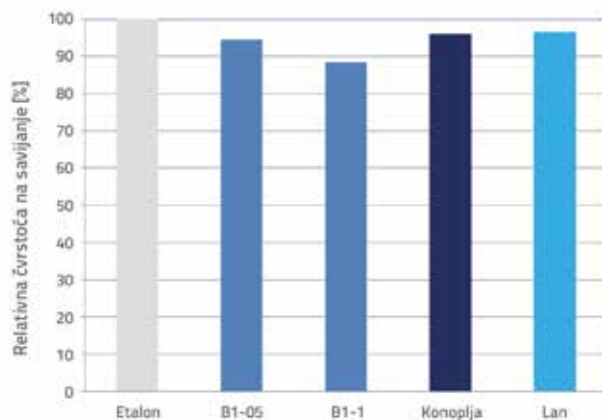


Slika 12. Utjecaj udjela vlakana na rezultate čvrstoća za duljinu vlakna od 10 mm

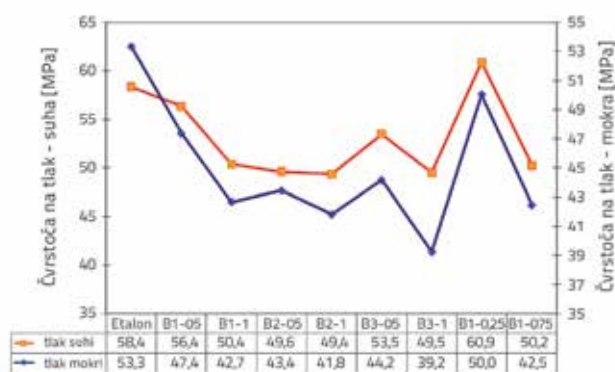
Dobiveni rezultati na uzorcima brnistre nisu lošiji od rezultata koji se inače dobivaju prilikom mikroarmiranja prirodnim vlaknima. Uzorci B1-05 i B1-1 uspoređeni su s prethodnim ispitivanjima [16] kad su autori ispitivali cementni mort napravljen s vlaknima konoplje i lana. Merta i ostali [16] napravili su cementni mort s nešto drukčijim sastavom, pa su dobiveni rezultati tlačne i savojne čvrstoće prikazani u relativnom odnosu prema etalonu.



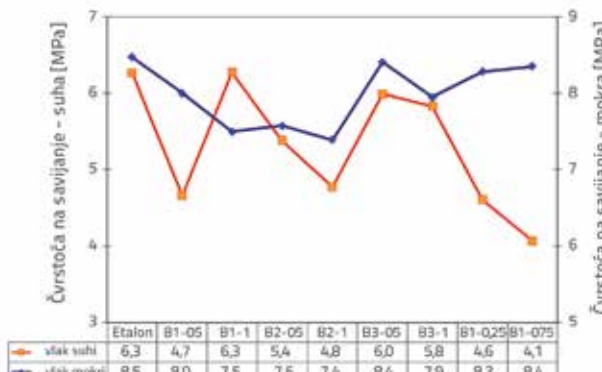
Slika 13. Relativna tlačna čvrstoća, rezultati za konoplju i lan uzeti su iz [16]



Slika 14. Relativna savojna čvrstoća, rezultati za konoplju i lan uzeti su iz [16]



Slika 15. Rezultati čvrstoće na tlak, vlažni i suhi uzorci



Slika 16. Rezultati čvrstoće na savijanje, vlažni i suhi uzorci

Rezultati tlačne čvrstoće prikazani su na slici 13., a rezultati savojne čvrstoće na slici 14.

Prema slici 13., uzorci s brnistrom u količini od 0,5 % ukupnog volumena dali su rezultate bolje tlačne čvrstoće u odnosu na sva vlakna u količini od 1 % volumena. Uzorak B1-1 bliži je rezultatu dobivenom na konoplji, a lan ima najmanju čvrstoću.

Čvrstoća na savijanje uzorka B1-05 bliža je rezultatima dobivenim na konoplji i lanu, slika 14.

S obzirom na istraživanje Nekkaa i ostalih [11] te Šatovića [8] da postoji razlika u čvrstoći mokrog i suhog vlakna brnistre, u ovom su radu ispitani i suhi uzorci. Uzorci su nakon 28 dana izvađeni iz vode i ostavljeni sedam dana u prostoriji na temperature 20 °C i relativnoj vlažnosti 50 %. Dobiveni rezultati prikazani su na slikama 15. i 16. Prema slici 15., dijagrami čvrstoće na pritisak za suhe i mokre uzorke pokazuju istu zakonitost. Kod čvrstoće na savijanje (slika 16.) suhi uzorak sa B1-1 ima bolje rezultate u suhom nego u vlažnom stanju, a uzorak B1-075 s najvećom vlažnom čvrstoćom, u suhom stanju pokazuje najveći pad. S obzirom na to da su se uzorci za suho i mokro ispitivanje pripremali u istoj posudi, moguće je da su prilikom miješanja vlakna nejednoliko raspoređena za obje serije uzoraka. Uzorak B3-05 ima dobre rezultate u suhom i mokrom stanju, što je u skladu s istraživanjima Kirina i ostalih [15].

Iako kratka vlakna uglavnom ne pridonose porastu čvrstoća uzoraka, njihov doprinos bi trebao biti u povećanju žilavosti materijala. Autorima ovoga rada ostaje napraviti isto ispitivanje za uzorke s vlaknima brnistre.

#### 4. Zaključak

Brnistra je samonikla grmolika biljka mediteranskog područja, u kojem je nekada davno imala mnogo veću važnost. Koristila se kao tekstila sirovina, za izradu obuće, konopa, jedara, mreža, košara, itd. Pojavom industrijskih biljaka poput konoplje i lana, s vremenom je opadala njezina uporaba. U usporedbi s lanom i konopljom, brnistru je znatno lakše uzgojiti jer nije zahtjevna u pogledu odabira tla i, što je još važnije, jednom posađena može trajati i do 20 godina za razliku od jednogodišnjih biljaka lana i konoplje koje još zahtijevaju i kvalitetno tlo. Uporaba vlakana brnistre nalazi primjenu i u kompozitnim materijalima, a u ovom radu je prvi put ispitana mogućnost ojačanja cementnog kompozita vlaknima brnistre. Prema dobivenim rezultatima koji su uspoređeni s drugim celuloznim vlaknima, uporaba vlakana brnistre ima potencijala kao ojačalo u cementnom kompozitu. Pokazalo se da vlakna duljine 10 i 30 mm imaju najveći potencijal za povećanje čvrstoće



na savijanje, ali dulja vlakna su utjecala na veće smanjenje čvrstoće na pritisak. Potrebno je temeljitije istraživanje kako bi se našla optimalna kombinacija količine i duljine vlakna brnistre u cementnoj matrici. Planira se ispitati utjecaj vlakana na žilavost betona/morta, što bi i bila primarna uloga kratkih vlakana u kompozitu.

Možda cijena proizvodnje vlakna brnistre nije do sada bila konkurentna ostalim vrstama prirodnih vlakana, ali s obzirom

na unapređivanje održive gradnje i uz određene uvjete, mogla bi postati zanimljiva. Ideja se odnosi na kultivirani uzgoj brnistre, jer se ta biljka ubraja u zaštićene biljne vrste. Njezina uloga u kompozitima može se razvijati paralelno s uređenjem okoliša, zaštitom prometnica, procesom pošumljavanja i ostalim mogućim primjenama, posebno ako se usavrši postupak izdvajanja vlakana na čemu se intenzivno radi. Brnistra svakako zaslužuje veću pozornost.

## LITERATURA

- [1] Ukrainczyk, V.: Beton - struktura, svojstva tehnologija, Alcor, Zagreb, 1994.
- [2] FAO corporate document repository, <http://www.fao.org/docrep/007/ad416e/ad416e08.htm>, 26.11.2017.
- [3] Yan, L., Kasal, B., Huang, L.: A review of recent research on the use of cellulosic fibers, their fibre fabric reinforced cementitious, geopolymer and polymer composites in civil engineering, Composites Part B, Engineering, 92 (2016), pp. 94-132.
- [4] Rogić, V.: Primjena konoplje u betonu, Diplomski rad, Građevinski fakultet Osijek, 2015.
- [5] Komuraiah, A., Shyam Kumar, N., Durga Prasad, B.: Chemical composition of natural fibers and its influence on their mechanical properties, Mechanics of Composite Materials, 50 (2014) 3, pp. 359-376, <https://doi.org/10.1007/s11029-014-9422-2>.
- [6] Natural Fiber Composites, Taylor & Francis Group, LLC, Boca Raton, FL, USA, 2016.
- [7] The Spanish Broom as a Fibre Plant. (*Spartium junceum*, L.), Bulletin of Miscellaneous Information (Royal Botanic Gardens, Kew), 1892 (1892) 63, pp. 53-58.
- [8] Šatović, F.: Brnistra (*Spartium junceum* L.) celulozovlaknata mediteranska biljka, Poljoprivreda i šumarstvo, XXXIV, 2-3 (1988), pp. 61-77.
- [9] Angelini, L.G., Lazzeri, A., Levita, G., Fontanelli, D., Bozzi, C.: Ramie (*Boehmeria nivea* (L.) Gaud.) and Spanish Broom (*Spartium junceum* L.) fibres for composite materials: agronomical aspects, morphology and mechanical properties, Industrial Crops and Products, 11 (2000) 2-3, pp. 145-161, [https://doi.org/10.1016/S0926-6690\(99\)00059-X](https://doi.org/10.1016/S0926-6690(99)00059-X)
- [10] Angelini, L.G., Tavarini, S., Foschi, L.: Spanish Broom (*Spartium junceum* L.) as New Fiber for Biocomposites: The Effect of Crop Age and Microbial Retting on Fiber Quality, Conference Papers in Materials Science, vol. 2013, Article ID 274359, 5 pages, 2013.
- [11] Neekka, S., Guessoum, M., Haddaoui, N.: Water Absorption Behavior and Impact Properties of *Spartium Junceum* Fiber Composites, International Journal of Polymeric Materials, 58 (2009) 9, pp. 468-481, <https://doi.org/10.1080/00914030902936535>.
- [12] Picuno, P.: Use of traditional material in farm buildings for sustainable rural environment, International Journal of Sustainable Built Environment, 5 (2016) 2, pp. 451 - 460, <https://doi.org/10.1016/j.ijsbe.2016.05.005>
- [13] Greco, P.F., La Greca, G., Larocca G., Meduri, S., Sinopoli, B., Battaglia, D., Caseti, A., Aloise, A., Chidichimo, G., Danieli, G.: Automatic System for Fibers Extraction from Brooms, Advances in Italian Mechanism Science, Mechanisms and Machine Science 47, Proceedings of the First International Conference of IFToMM Italy, pp. 247 - 255, 2017.
- [14] Islam, M.S., Hussain, R.R., Morshed, Md.A.Z.: "Fiber-reinforced concrete incorporating locally available natural fibers in normal- and high-strength concrete and a performance analysis with steel fiber-reinforced composite concrete", Journal of Composite Materials, 46 (2011) 1, 12 pages.
- [15] Kiran, C.U., Reddy, G.R., Dabade, B.M., Rajesham, S.: Tensile properties of sun hemp, banana and sisal fiber reinforced polyester composites, Journal of Reinforced Plastics and Composites, 26 (2007) 10, pp. 1043-1050, <https://doi.org/10.1177/0731684407079423>
- [16] Merta, I., Šajna, A., Poletanović, B., Milovanović, A.: Influence of natural fibers on mechanical properties and durability of cementitious mortars, CoMS - 1<sup>st</sup> International Conference on Construction Materials for Sustainable Future, pp. 1 - 8, 2017.